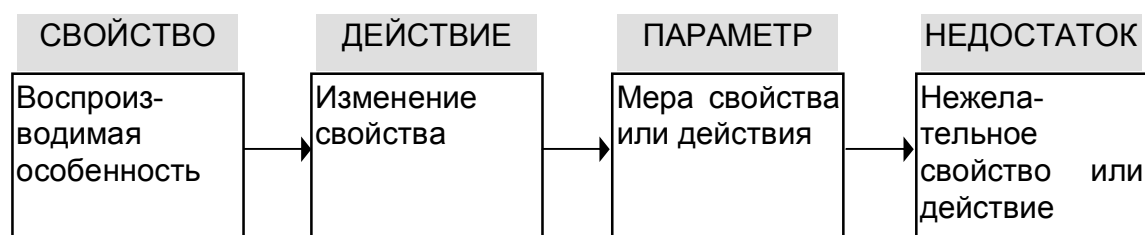


## ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ НЕДОСТАТКОВ ТЕХНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

*Изложен функциональный метод причинно-следственного моделирования, придающий этой процедуре контрольно-проверочные функции в процессе функционально-стоимостного анализа*

Табл. 1

	ТЕРМИНЫ	ОПРЕДЕЛЕНИЯ	TERMS
1	Свойство	Воспроизводимая особенность	Property
2	Действие	Изменение свойства	Action
3	Параметр	Мера свойства или действия	Parameter
4	Недостаток	Нежелательное свойство или действие	Disadvantage
5	Целевые недостатки	Наблюдаемые недостатки ТС, служащие поводом к ее усовершенствованию	Goal disadvantage
6	Причинно-следственная цепочка недостатков в (ПСЦН)	Последовательность недостатков ТС, связанных отношениями причинности	Cause-effect chain of ES disadvantages
7	Причинно-следственная модель недостатков в (ПСМН)	Графическое отображение причинно-следственных связей между недостатками ТС. Содержит вершины, отображающие недостатки, направленные дуги, отображающие причинную связь между недостатками, и логические знаки, уточняющие отношения причинности	Cause-effect model of disadvantages
8	Ключевые недостатки	Звенья в ПСМН, исключение которых наиболее эффективно разрушает цепочки недостатков, ведя к устранению целевых недостатков. Как правило, находятся в начале цепочек или в узлах ПСМН	Key disadvantages
9	Причинно-следственный анализ недостатков в (ПСАН)	Выявление причин возникновения <i>целевых недостатков</i> ТС для определения ее <i>ключевых недостатков</i>	Cause-effect analysis of disadvantages



## Методические рекомендации

Причинно-следственное моделирование (ПСМН) и анализ (ПСАН) недостатков технической системы (ТС), как правило, завершают аналитические процедуры при функционально-стоимостном анализе ТС и служат для выявления ключевых задач ее совершенствования [1, 2]. Однако само моделирование обычно ведется произвольно, что снижает его потенциальные возможности. Предлагаемый метод придает ПСАН роль инструмента, управляющего глубиной анализа ТС на всех этапах ее моделирования.

### Исходные положения:

- ПСМН как часть функционального анализа должно отображаться на функциональном языке. Поэтому элементами ПСМН (в соответствии с определением функции) могут быть только действия и свойства. Это значит, что элементы типа «нежелательный объект» или «нежелательная связь между объектами» являются нераскрытыми и подлежат исключению.
- Следовательно, выявление отношений причинности сводится к выявлению взаимообусловленности свойств и действий. В отличие от вопросов «как?», «зачем?», «почему?» вопросы «вследствие какого свойства?» и «вследствие какого действия?» представляются имеющими больший физический смысл и поэтому более продуктивными.
- Любое действие обусловлено неким свойством так же, как и само порождает изменение свойства. Это значит, что причинные связи типа «действие-действие» или «свойство-свойство» являются нераскрытыми и подлежат уточнению.
- Поскольку мерой любого действия или свойства служит параметр, возможность его идентификации для нежелательных действий и свойств является критерием достаточной глубины тех видов моделирования, которые выявили данный недостаток.

Отсюда вытекает следующий порядок построения ПСМН:

1. *Определить главную функцию ТС.*
2. *Указать цель (если целей несколько – одну из них) совершенствования ТС.*
3. *Выразить целевой недостаток в функционально-параметрической форме.*
4. *В функциональной модели ТС выделить функции, связанные с появлением целевого недостатка.*
5. *Выписать недостатки, связанные с реализацией каждой из выделенных функций. Исключить недостатки, которые не могут иметь отношение к рассматриваемому целевому недостатку. Оставшиеся недостатки*

- разделить на три группы: нежелательные действия, нежелательные свойства и нежелательные связи.*
- 6. Заменить недостатки типа «нежелательная связь» свойствами связанных объектов и нежелательным действием, к которому в силу этих свойств ведет нежелательная связь.*
  - 7. Соединить недостатки в пары: нежелательное действие – вызывающее его свойство, нежелательное свойство – обуславливающее его действие.*
  - 8. Из полученных пар недостатков построить причинно-следственные цепочки недостатков (ПСЦН), чередуя свойства и действия: свойство – действие – (неизвестное свойство) – действие -... - свойство - (неизвестное действие) ...*
  - 9. При наличии одинаковых элементов в разных ПСЦН – объединить цепочки: если из нескольких причин любая ведет к одному и тому же следствию, объединить эти причины знаком дезъюнкции; если следствие возникает только при одновременном действии нескольких причин, объединить эти причины знаком конъюнкции.*
  - 10. Для дополнения ПСЦН недостающими звеньями перейти на более низкий иерархический уровень моделирования неясной части ТС. Это может отразиться на потоковой модели, модели жизненного цикла и пр. Но в любом случае полученные уточнения должны быть внесены в функциональную модель.*
  - 11. После достройки функциональной модели повторить процедуру для вновь выясненных свойств и действий, начиная с п.4. При необходимости - перейти на следующий иерархический уровень моделирования.*
  - 12. Критерием отсутствия такой необходимости служит определение конкретных значений параметров нежелательных свойств, а значит - понимание механизма нежелательных действий на физико-химическом уровне.*
  - 13. Упростить ПСЦН, исключив последовательные звенья, несущественные для анализа структуры. Выделить те участки типа «действие – свойство - действие», которые представляют собой известные физические (химические, биологические) эффекты.*
  - 14. Аналогично провести синтез ПСМН для всех целевых недостатков, после чего перейти к анализу полученных структур [3].*

Изложенная методика наиболее эффективна, если построение ПСМН начинать одновременно с началом ФСА. В этом случае обеспечиваются:

- правильный выбор параметров нежелательных свойств и действий, ориентированный на выделенный параметр целевого недостатка
- оптимальная степень детализации каждой из подсистем в процессе их моделирования
- рациональная последовательность аналитических процедур

- выделение тех из них, выполнение которых нецелесообразно, или, наоборот, необходимо (так, например, если размерности параметров главной функции и целевого недостатка совпадают, ведущей процедурой должен стать потоковый анализ)
- исключение гаданий и волюнтаризма при связывании цепей ПСМ
- малое число рекурсий при моделировании

Следствием этих достоинств является высокая степень вероятности вскрытия глубинных, неочевидных причин недостатков ТС при минимальных трудозатратах.

**Методика анализа****на примере технической системы для упаковки изделий**

1. Из функциональной модели  
выписать главную функцию ТС: *Изолировать изделие*
2. Указать цель совершенствования ТС: *Повысить надежность упаковки*
3. Указать целевые недостатки - конкретные неудовлетворительные свойства, параметры, признаки, служащие поводом для совершенствования ТС (*ответить на вопрос, в чем проявляется ненадежность*):

Целевые недостатки ТС

Табл. 2

По данным Заказчика (исходные целевые недостатки)	По результатам анализа (выявленные целевые недостатки)
<i>сморщивание мешка</i>	<i>частичное разъединение сваренных краев мешка (рис. 1)</i>
<i>разрыв мешка</i>	

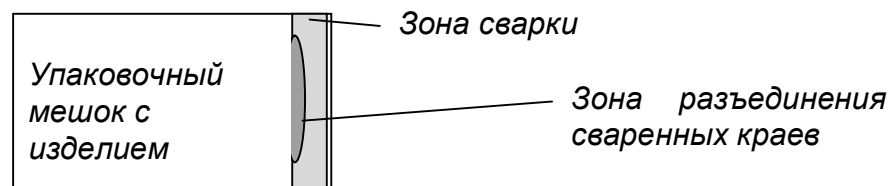


Рис. 1

4. Выписать функции, связанные с появлением каждого целевого недостатка:  
Функции, сопутствующие недостаткам

Табл. 3

Целевой недостаток	Действие и объект функции <sup>1</sup>	УВФ <sup>2</sup>
1. <i>Сморщивание мешка</i>	<p style="text-align: center;"><i>Заварить края мешка</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• <i>подвернуть края</i></li> <li>• <i>соединить края</i></li> <li>• <i>сжать края (в контактной зоне)</i></li> <li>• <i>нагреть контактную зону</i></li> <li>• <i>остудить контактную зону</i></li> <li>• <i>разгрузить контактную зону</i></li> <li>• <i>деформировать край</i></li> </ul> <p><i>изделие: разъединять края</i></p>	<p style="text-align: center;"><i>И</i></p> <p style="text-align: center;"><i>А</i></p> <p style="text-align: center;"><i>А</i></p> <p style="text-align: center;"><i>?</i></p> <p style="text-align: center;"><i>?</i></p> <p style="text-align: center;"><i>А</i></p> <p style="text-align: center;"><i>Вр</i></p> <p style="text-align: center;"><i>Вр</i></p>
2.		
3.		

5. Выписать недостатки, связанные с целевыми недостатками. Они возникают вследствие неадекватного выполнения полезных функций и наличия вредных функций. Следует обращать внимание на функции, уровень выполнения которых не удалось определить. Здесь могут содержаться невыявленные недостатки.

Нежелательные особенности реализации функций разделить на три вида: нежелательное действие; нежелательное свойство; нежелательная связь<sup>3</sup>.

Формулировка недостатков ТС

Табл.4

Функция	Нежелательное свойство	Нежелательное действие	Нежелательная связь
<i>подвернуть край</i>	<i>растянутость (деформация) края</i>		
	<i>складчатость края</i>		
<i>нагреть контактную зону</i>			<i>контакт нагревателя с мешком</i>
<i>остудить контактную зону</i>	<i>напряжения в материале</i>	<i>неравномерное остужение (неравномерный теплоотбор)</i>	
		<i>местные сдвиги</i>	

<sup>1</sup> Для краткости носитель функции там, где это элемент оборудования, не указан

<sup>2</sup> Уровень выполнения функции: А – адекватный, Н – недостаточный, И – избыточный, ? – не определен. Вр – вредная функция

<sup>3</sup> Может содержать невыявленные недостатки

		<i>в сварном соединении</i>	
<i>разгрузить контактную зону</i>		<i>разъединение сваренных краев в зонах напряжения</i>	

6. Заменить недостатки типа «нежелательная связь» свойствами (параметрами) связанных объектов и нежелательным действием, к которому в силу этих свойств ведет нежелательная связь.
7. Соединить выявленные недостатки в пары, дополнив:
- нежелательное действие – свойством, его вызвавшим;
  - нежелательное свойство – действием, его обусловившим.

Формулировка причин недостатков ТС

Табл.5

Функция	Нежелательное свойство	Нежелательное действие	Нежелательная связь
<i>подвернуть края</i>	<i>Растянutosть краев</i>	<i>← избыточное натяжение</i>	
	<i>Складчатость краев</i>	<i>← недостаточное натяжение</i>	
<i>нагреть контактную зону</i>	<i>свойство нагревателя ?</i>	<i>слипание поверхности</i>	<i>контакт нагревателя с мешком</i>
	<i>свойство материала мешка ?</i>	<i>мешка с нагревателем</i>	
<i>остудить контактную зону</i>	<i>напряжения в материале</i>	<i>← натяжение материала</i>	
	<i>рельеф коэф-та теплопередачи</i>	<i>→ неравномерный теплоотбор</i>	
	<i>неравномерная натянутость краев при неполном остывании</i>	<i>→ местные сдвиги в сварном соединении</i>	
<i>разгрузить контактную зону</i>	<i>разъединяющее натяжение в отсутствие внешнего сжатия</i>	<i>→ разъединение сваренных сторон в зонах напряжения</i>	

Полученные пары «причина⇒следствие» являются элементами причинно-следственных цепей недостатков (ПСЦН), в конце которых находятся выявленные целевые недостатки, а в начале - исходные недостатки (возможно, еще не выявленные).

8. Построить причинно-следственные цепочки, связывая друг с другом элементы ПСЦН и по возможности чередуя свойства и действия:  
 свойство ⇒ действие ⇒ ?(неизвестное свойство) ⇒  
 ⇒ действие ⇒ свойство ⇒ ?(неизвестное действие) ⇒ ....

При построении (рис.2) желательно исходные недостатки отображать на листе сверху и слева, а результирующие - снизу и справа. В ряде случаев, для указания источника возникновения недостатка, целесообразно отобразить соответствующие компоненты ТС (например, операции техпроцесса) или моменты существования ТС - например, этапы жизненного цикла.

9. При наличии одинаковых элементов в разных цепочках – объединить цепочки. При этом если следствие возникает только при одновременном



действию нескольких причин, объединить эти причины знаком конъюнкции (&).

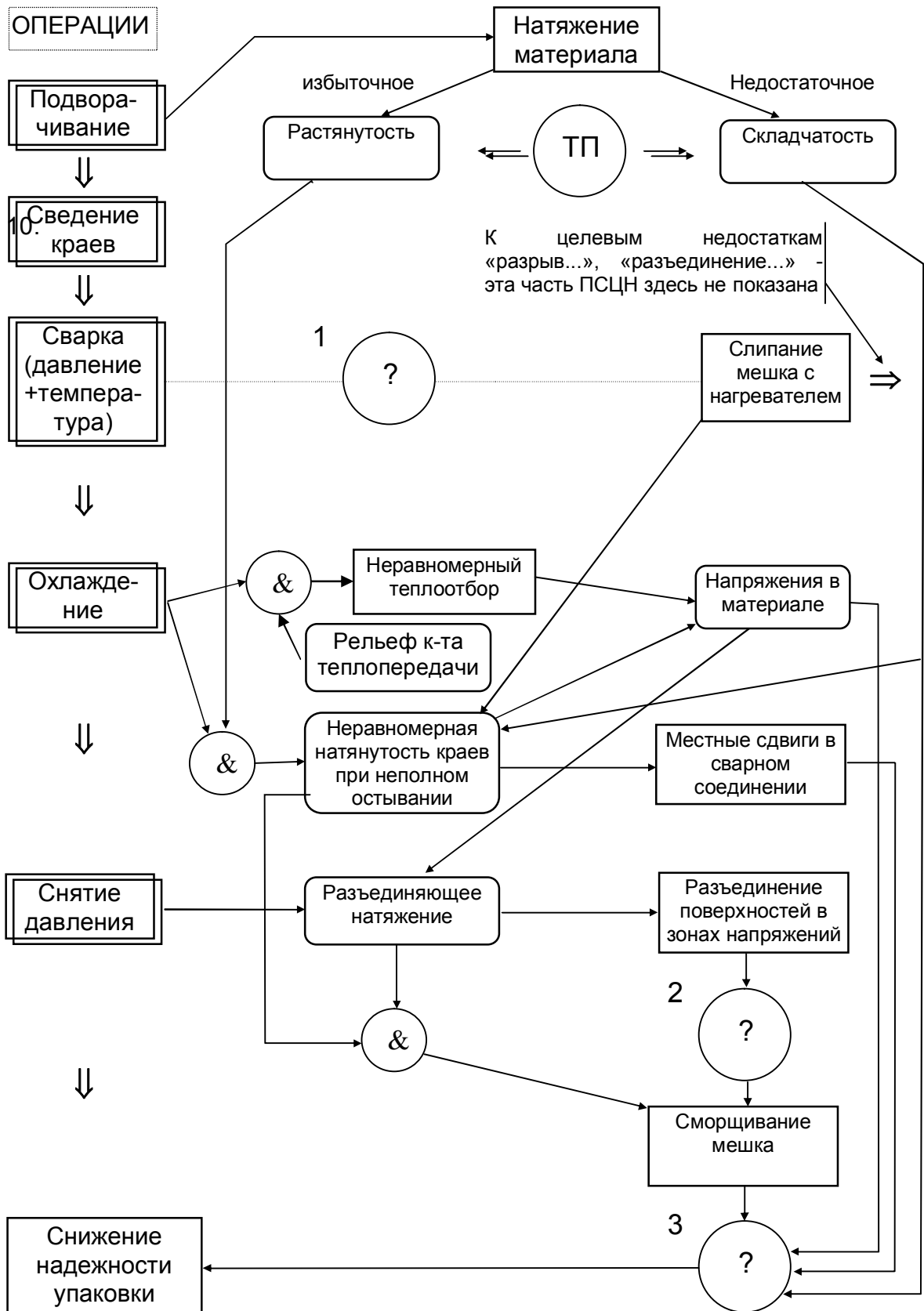


Рис. 2

10. Для дополнения цепочек недостающими звеньями перейти на более низкий иерархический уровень функционального моделирования неясной части ТС подобно тому, как это было сделано в п.4 для целевого недостатка<sup>4</sup>.

Табл. 3-бис.

Недостатки	Функции
Слипание поверхности с нагревателем	<p><i>Сжать края в контактной зоне (рис.3)</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• прижать нагреватели (к наружным поверхностям листов в контактной зоне)</li> <li>• переместить листы (навстречу друг другу)</li> <li>• сжать листы (с давлением <math>P \geq P_{\text{дифф}}</math>)</li> </ul>
	<p><i>Нагреть контактную зону</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• нагреть нагреватели (до температуры <math>T_1 \geq T_{\text{дифф}}</math>)</li> <li>• нагреть наружные стороны листов (<math>T_2 \geq T_{\text{дифф}}</math>)</li> <li>• нагреть диффузный слой (<math>T_3 \geq T_{\text{дифф}}</math>), <math>T_3 &lt; T_2 &lt; T_1</math></li> <li>• выдержать диффузные слои при <math>P \geq P_{\text{дифф}}</math>, <math>T_3 \geq T_{\text{дифф}}</math> в течение времени диффундирования</li> </ul>

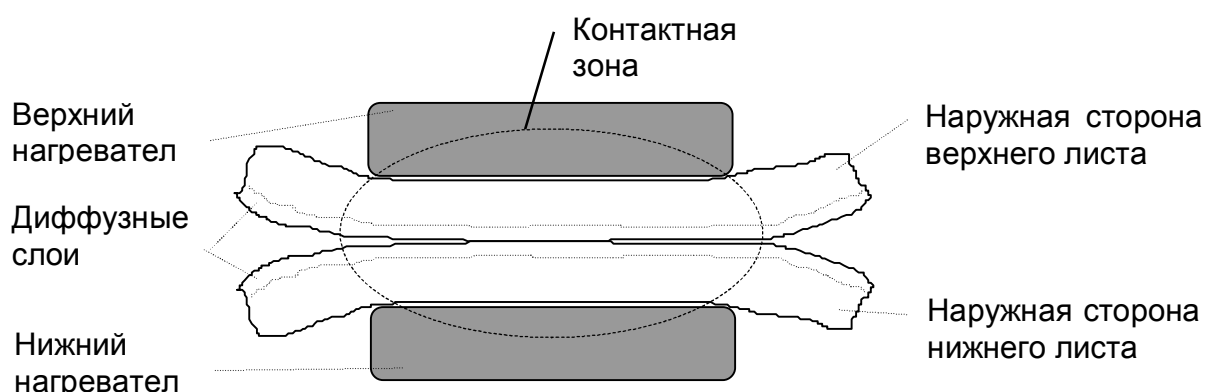


Рис. 3

<sup>4</sup> это может потребовать также уточнений потоковой модели, модели жизненного цикла и пр.

11. После достройки функциональной модели повторить процедуру по п.п. 5, 6 для невыясненных свойств и действий.

При необходимости - перейти на следующий иерархический уровень. Например, рассмотреть функцию «*выдержать диффузные слои ...*» на молекулярном уровне.

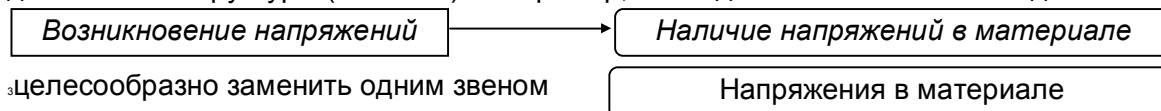
Критерием отсутствия такой необходимости могут служить выяснение конкретных значений параметров нежелательных свойств и понимание механизма нежелательных действий на физико-химическом уровне.

Табл.4, 5-бис

Функция	Нежелательное свойство	Нежелательное действие	Нежелательная связь
нагреть  контактную  зону	<i>низкая теплопроводность материала</i>	<i>вынужденный перегрев нагревателя</i>	
	<i>избыточная адгезивность при <math>T_2 &gt; T_{дифф}</math></i>	<i>перегрев наружной стороны листов</i>	<i>контакт</i>
	<i>потеря эластичности</i>		<i>нагревателя с</i>
	<i>смачиваемость поверхности нагревателя перегретым свариваемым материалом</i>	<i>слипание поверхности мешка с нагревателем</i>	<i>мешком</i>

12. Достроить причинно-следственную модель недостатков ТС (рис. 4).

В дальнейшем можно упростить ПСЦН, исключив звенья и участки, несущественные для анализа структуры (см. п. 14). Например, последовательные звенья вида



Неветвящийся участок цепи  $C1 - D1 - C2 - D2 - C3 - D3$  (где  $C$  - свойство,  $D$  - действие) можно упростить до  $C1 - D3$  и т.д.

В ряде случаев звенья типа  $D1 - C2 - D2$  представляют собой известные физические (химические, биологические) эффекты и могут быть заменены одним элементом

Э1

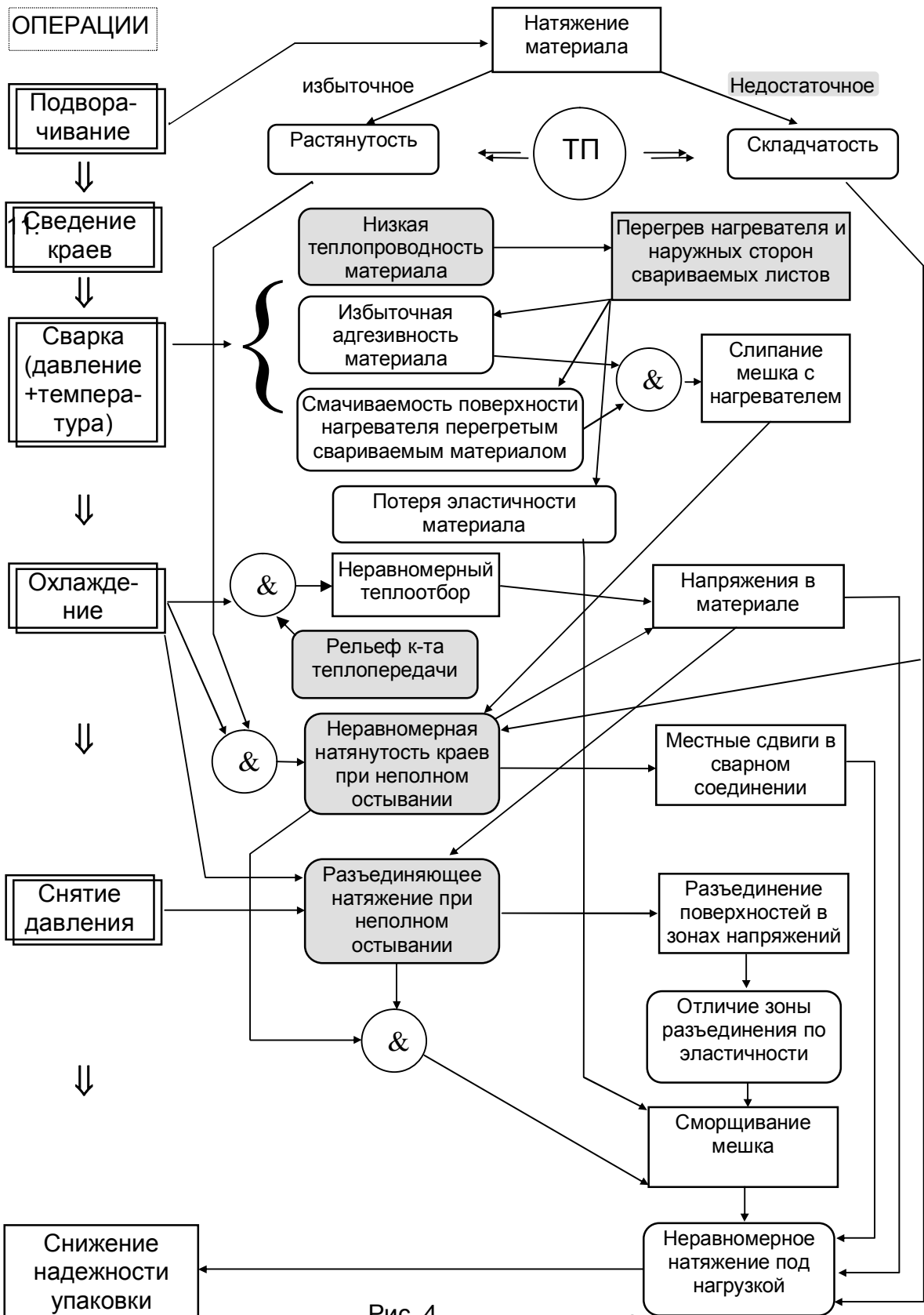


Рис. 4  
Причинно-следственное моделирование и анализ недостатков ТС  
А.В.Кислов

13. Аналогичным образом провести синтез ПСМН для всех целевых недостатков.
14. Перейти к анализу полученных моделей. Выделить ключевые недостатки (на рис. 4 затемнены), устранение которых приведет к разрушению цепи и устранению целевых недостатков.

#### ПРИМЕЧАНИЯ.

- Определение ключевых недостатков может вестись визуально, на основе здравого смысла, или строго – например, на основе булевой алгебры.
- Обычно достижение результата (устранение целевых недостатков) возможно разными способами, т.е. устранением той или иной группы недостатков ТС.
- Выбор наиболее простого способа – за разработчиком. Как правило, целесообразно устранять недостатки, находящиеся в начале и в узлах ПСЦН.

15. Сформулировать ключевые задачи - как задачи по устранению ключевых недостатков:

- как не допустить недостаточное натяжение сторон при подворачивании?
- как повысить теплопроводность материала упаковки в зоне сварки? ИЛИ
- как избавиться от необходимости перегрева нагревателя при низкой теплопроводности свариваемого материала?
- как исключить перегрев наружных сторон свариваемых листов?
- как обеспечить равномерное остывание материала во всей зоне сварки?
- как исключить неравномерные и разъединяющие нагрузки в зоне сварки при снятии внешнего давления до полного охлаждения зоны сварки?

Даже из этих недостатков не все необходимо устранять: например, если устранен второй из них, нет нужды устранять третий и наоборот.

Если же включить в область рассмотрения и сами операции, то можно ограничиться решением двух следующих ключевых задач:

- как повысить теплопроводность материала?
- как исключить охлаждение зоны сварки?

Решение первой группы задач ведет к совершенствованию данной технологии, решение второй группы – к новому принципу действия.